干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

黄河下游冲积平原潮土土壤孔隙微形态特征①

张保华， 陶宝先， 曹建荣， 刘子亭
（聊城大学环境与规划学院，山东 聊城 252000）

摘 要：土壤颗粒排列是影响孔隙特征的最基本因素。土壤薄片能够直接观察且定量的分析土壤孔隙特征。为了解不同质地土壤的孔隙差异，于山东省东昌府区采集不同质地土壤（壤土、黏壤土、砂质壤土），通过常规方法和土壤微形态技术对比分析土壤孔隙特征。结果表明：三类样地土壤孔隙度均为表层向下逐渐减少。表层、底层差异在砂质壤土中主要体现于总孔隙度与毛管孔隙度，黏壤土、壤土则主要体现为总孔隙度与非毛管孔隙度。砂质壤土中各土层均以简单堆集孔隙为主；而 0～10 cm 黏壤土、壤土以复合堆积孔隙为主，其下复合堆积孔隙减少、其他形状孔隙增多。薄片图像测定孔隙数量可反映常规分析总孔隙度的 50% 左右，对于非毛管孔隙度则可反映 80% 左右。因此，土壤薄片更适合分析土壤非毛管孔隙。

关 键 词： 土壤质地；土壤微形态；孔隙度；孔隙形状
文章编号

土壤孔隙是土壤结构的重要组成部分，其大小分配、分布和连通状况以及空间相关性等特征对水分和溶质运移、植物根系伸展和土壤肥力产生重要影响，决定着土壤的生产力和高产稳产的农业生产方式[1]。土壤孔隙特征的差异取决于土壤颗粒组成、有机碳含量和结构等[2]，其中土壤颗粒不同的空间排列构成不同的孔隙几何、数量特征[3]。在黄河下游冲积平原地区，由于黄河泥沙含量高且历史上多次改道、泛滥，河流沉积物在水平、垂直方向均存在很大差异，构成了该地区土壤质地的复杂性和质地剖面层次的多样性[4-5]，对土壤孔隙的通气透水性、肥力提升产生较大影响。因此，研究黄河下游冲积平原不同质地土壤的孔隙形状、数量及其分布特征，对于改善土壤质量具有重要意义。

土地利用及管理方式可使土壤理化性质产生诸多变化。目前研究侧重探讨不同土地利用和管理方式对土壤孔隙的影响。如轮作比连作、翻耕比免耕均可明显增加团聚体孔隙度[6]，长期秸秆还田增加土壤总孔隙度，降低中等孔隙（30～75 μm）数量，增加大孔隙（>75 μm）的不规则性和偏长度[7]。相对于翻耕，长期免耕可降低耕层土壤孔隙度，并增加孔隙结构的复杂程度[8]。且翻耕深度、秸秆还田等对土壤孔隙状况的影响因土壤质地不同而存在差异，对壤土改良效果优于黏土[9]，同时，传统、有机农业耕作对土壤孔隙的影响因作物不同也存在差异[10]。在黄土高原，植被自然恢复演替能明显促进土壤孔隙状况的提高，且促进作用随着恢复演替时间的延长和植被类型的改变逐渐增强，最终在顶级群落阶段土壤孔隙参数达到最优[11]。黄河三角洲地区，有植被区土壤孔隙度明显高于裸地，且麦田的土壤孔隙度高于棉田及芦苇、碱蓬分布区[12]。然而，上述研究较少涉及颗粒组成这一土壤孔隙最基本的影响因素。土壤微形态能够通过显微镜观察肉眼无法观察和提取的土壤信息，土壤微形态特征可以反映土壤形成、发育演变与环境的关系，有助于深入了解自然、人为因素对土壤形成、发育的影响[13]。但利用土壤微形态技术与常规方法对比分析不同质地土壤孔隙特征的研究仍不充分。

聊城市位于山东省西部，除东南少量低丘，全区为黄河冲积平原。据第二次全国土壤普查，聊城市土壤类型划分为 4 个土类，其中潮土为主要土类，土壤面积约为 7×10^3 km^2，占土壤总面积的 94%[14]。本研究于山东省聊城市东昌府区选择砂质壤土、壤土、黏壤土质地且均长期种植冬小麦—夏玉米的农

① **收稿日期：**2019-06-20； **修订日期：**2019-09-04
基金项目：山东省自然科学基金（ZR2016DM14）；山东省高等学校科技发展计划（J15Lh09）资助
作者简介：张保华（1971-），男，教授，博士，主要从事土壤地理与微形态、土地资源学研究. E-mail：zhangbaohua@lcu.edu.cn

田中采集样品,以常规方法测定孔隙度、结合土壤薄片图像处理,研究不同质地潮土的土壤孔隙特征,以期对改善农田土壤质量提供帮助。

1 研究区概况与样品处理

1.1 研究区域概况

东昌府区是聊城市政府驻地(115°14′~116°08′E, 36°16′~36°42′N),总面积1 254 km^2,常住人口102.56×10^4。属暖温带大陆性季风气候区、半干燥大陆性气候,年均温13.5 ℃,7月气温最高(26.9 ℃),1月气温最低(-2.5 ℃),年均降雨量546.9 mm,夏季占全年62.2%,年际变化大,雨热同期。地貌特征为黄河冲积低平宽广平原,缓岗、坡地、洼地在平原上交错分布,海拔31~38 m,土壤为潮土、少量盐土,土质适宜多种农作物的种植,主要种植作物为玉米、小麦、油料、蔬菜。

1.2 样品采集处理分析

2017年6月,在东昌府区北城办事处东鲁村(壤土)、许营镇绣衣集和汪庄村(砂质壤土)、朱老庄镇田庄村(黏壤土)选择长期小麦—玉米轮作地块作为样地,每类样地挖取土壤剖面各4个,共计12个。每个剖面采集0~25 cm深度土样、每层5 cm。采样时,每层的样品分成两份:一份为常规样品,采用直径5 cm土钻、每层取3个土样并混合,自封袋保存,用于土壤理化性质分析;另一份为原状样品,采用环刀取样、硬质塑料盒保存,防止运输过程中样品被挤压,用于容重及土壤孔隙分析。其中,土壤微形态分析为每类样地选择一个典型剖面进行,采用方形、硬质塑料合分层采样,便于土样后期的浸渍、固化及切割。

常规样品在室内自然风干、研磨、过2 mm筛,测定土壤理化性质。土壤pH值采用酸度计法,有机碳含量采用重铬酸钾氧化—外加热法,土壤机械组成采用吸管法,容重、毛管孔隙度采用环刀法,总孔隙度由比重、容重计算得来,非毛管孔隙度为总孔隙度减毛管孔隙度[15]。用于土壤微形态分析的原状土样,利用198#不饱和聚酯树脂(含固化剂)浸渍固化后,切片、粗磨、细磨,用环氧树脂粘在载玻片上,之后再对另一面进行切片、粗磨、细磨,以冷杉胶粘盖玻片,制成厚度约30 μm的土壤薄片,于Olympus偏光显微镜下观察并拍摄图片;土壤薄片按平行于地表方向切割。土壤孔隙形状描述采用Georges Stoops(2003)术语体系[16],用image proplus 6.0软件测量孔隙。

1.3 数据处理

每类样地的4个土壤剖面各土层pH、有机碳含量、土壤机械组成、容重、孔隙度利用单因素方差分析(LSD法)统计各指标在不同土层间的差异。采用Pearson相关分析研究土壤容重、有机碳含量、土壤孔隙度之间的相关性,显著性 $P<0.05$。统计分析采用SPSS 13.0软件。

图像处理为每个薄片均匀分布、拍摄9张照片,image proplus 6.0测定孔隙并取平均值。每张照片大小为2 048×1 536像素、实际大小1 300×975 μm,即每个像素约为0.4 μm^2。由于环刀底部吸水测定毛管孔隙大小约为直径0.1 mm[17],其面积相当于19 625像素,故用image proplus 6.0测定孔隙时分别测量全部孔隙及大于19 625像素的孔隙(即非毛管孔隙)。

2 结果与分析

2.1 土壤基本性质

按照国际制土壤机械组成,许营土壤中砂粒含量超过55%、黏粒少于15%,质地类型为砂质壤土;朱老庄土壤中砂粒含量介于30%~55%、黏粒介于15%~25%,为黏壤土;北城土壤中砂粒含量介于40%~55%、黏粒少于15%,为壤土(表1)。三类样地土壤容重均值介于1.01~1.46 g·cm^{-3},0~25 cm土层均值依次为许营(1.32±0.11 g·cm^{-3})、北城(1.31±0.18 g·cm^{-3})、朱老庄(1.21±0.17 g·cm^{-3}),朱老庄黏壤土相对较小(表1)。三类样地土壤容重均表现出随深度增加而增加的趋势,可能是由于上层土壤的压实作用所致。

三类样地土壤有机碳含量均值介于2.50~19.51 g·kg^{-1},均表现出随深度增加而降低的趋势。0~25 cm土层均值依次为:许营(7.13±4.04 g·kg^{-1}、朱老庄(12.75±5.10 g·kg^{-1})、北城(13.12±5.36 g·kg^{-1})。由方差分析可知,许营0~25 cm土层有机碳含量均值明显低于其他样地($P<0.05$),朱老庄与北城的有机碳含量无显明差异,朱老庄、北城在0~15 cm土壤有机碳含量均高于10 g·kg^{-1},而许营仅0~10 cm含量高于10 g·kg^{-1}(表1)。研究区土壤有机碳含量比以往有了较大幅度提升,与前期研究结果一致[18],主要是大量

表 1　土壤基本性质

Tab. 1　Basic properties of soil profile

采样点	深度	机械组成 %			容重 / g · cm^{-3}	有机碳 / g · kg^{-1}	pH
		2 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm			
许营	0 ~ 5 cm	73.2 ± 4.2 a	15.3 ± 4.8 a	11.5 ± 2.5 a	1.17 ± 0.04 c	10.94 ± 2.79 a	8.59 ± 0.72 a
	5 ~ 10 cm	74.2 ± 5.9 a	14.0 ± 7.5 a	11.8 ± 2.9 a	1.23 ± 0.02 b	10.68 ± 3.00 ab	8.50 ± 0.58 a
	10 ~ 15 cm	72.6 ± 8.5 a	20.4 ± 8.2 a	7.0 ± 4.4 a	1.39 ± 0.08 a	7.06 ± 1.82 bc	8.58 ± 0.50 a
	15 ~ 20 cm	79.0 ± 5.3 a	12.8 ± 3.3 a	8.2 ± 5.3 a	1.39 ± 0.05 a	4.48 ± 2.75 cd	8.61 ± 0.33 a
	20 ~ 25 cm	79.0 ± 3.3 a	13.1 ± 7.7 a	7.9 ± 5.3 a	1.42 ± 0.05 a	2.50 ± 1.38 d	8.68 ± 0.33 a
朱老庄	0 ~ 5 cm	51.2 ± 2.3 a	29.0 ± 1.1 a	19.8 ± 2.8 a	1.01 ± 0.05 c	18.42 ± 3.18 a	8.42 ± 0.07 a
	5 ~ 10 cm	47.4 ± 9.8 a	31.1 ± 6.8 a	21.5 ± 3.4 a	1.08 ± 0.09 bc	16.57 ± 1.99 ab	8.53 ± 0.23 a
	10 ~ 15 cm	46.2 ± 6.8 a	32.5 ± 4.7 a	21.3 ± 5.5 a	1.21 ± 0.12 b	13.70 ± 2.86 b	8.59 ± 0.28 a
	15 ~ 20 cm	46.9 ± 8.2 a	30.8 ± 7.5 a	22.3 ± 1.2 a	1.38 ± 0.07 a	8.50 ± 1.95 c	8.59 ± 0.25 a
	20 ~ 25 cm	54.8 ± 7.9 a	24.8 ± 5.9 a	20.4 ± 3.4 a	1.38 ± 0.02 a	6.56 ± 0.38 c	8.58 ± 0.21 a
北城	0 ~ 5 cm	51.2 ± 3.4 a	36.5 ± 7.7 a	12.3 ± 7.2 a	1.09 ± 0.21 c	19.51 ± 0.98 a	8.57 ± 0.05 a
	5 ~ 10 cm	51.2 ± 1.5 a	36.1 ± 7.4 a	12.7 ± 6.0 a	1.22 ± 0.15 bc	17.84 ± 0.86 a	8.60 ± 0.15 a
	10 ~ 15 cm	47.9 ± 2.2 a	38.1 ± 4.7 a	14.0 ± 6.1 a	1.37 ± 0.03 ab	13.41 ± 1.58 b	8.58 ± 0.03 a
	15 ~ 20 cm	49.3 ± 4.3 a	36.0 ± 3.7 a	14.7 ± 1.4 a	1.44 ± 0.02 a	8.40 ± 0.99 c	8.64 ± 0.10 a
	20 ~ 25 cm	47.9 ± 5.4 a	37.3 ± 5.3 a	14.8 ± 0.7 a	1.46 ± 0.01 a	6.46 ± 2.03 c	8.64 ± 0.16 a

注:不同的小写字母代表同一样地不同土层间有显著差异($P<0.05$),表中数据为均值 ± 标准差($n=4$)

秸秆还田的结果。研究表明,施加有机肥促进土壤团聚体形成[19]。由图 1b 可知,黏壤土(朱老庄)相对于砂质壤土(许营)具有明显的团粒结构。据此推测,秸秆还田促进黏壤土团聚体形成,团聚体对土壤有机碳的物理包裹作用,能减弱微生物对土壤有机碳的分解,进而促进有机碳在土壤中累积。由图 1a、1b、1e 可知,黏壤土(朱老庄)、壤土(北城)具有明显的团粒结构,砂质壤土(许营)的物质多呈简单堆叠状,且土壤组成物质颗粒较黏壤土(朱老庄)粗大。而且,砂质壤土(许营)土壤有机碳(即纯黑色、不透明区域)呈块状、零散分布于土壤中,有机碳缺乏团聚体的物理保护,易被土壤微生物获得、分解;而黏壤土(朱老庄)、壤土(北城)中有机碳相对均匀的分布于团聚体中,团聚体的物理保护作用能减缓有机碳分解,致使黏壤土(朱老庄)中有机碳含量相对较高。

2.2　土壤孔隙度

由表 2 可知,总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔

表 2　土壤孔隙度(体积比,%)

Tab. 2　Soil porosity (v/v, %)

采样点	土壤层次	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
许营	0 ~ 5 cm	55.89 ± 1.39 a	47.97 ± 0.75 a	7.92 ± 0.75 a
	5 ~ 10 cm	53.46 ± 0.78 a	45.38 ± 1.07 b	8.08 ± 1.52 a
	10 ~ 15 cm	47.52 ± 3.20 b	38.62 ± 3.07 d	8.90 ± 1.40 a
	15 ~ 20 cm	47.53 ± 1.72 b	38.78 ± 1.13 d	8.75 ± 2.83 a
	20 ~ 25 cm	46.40 ± 1.71 b	39.27 ± 1.32 cd	7.13 ± 2.26 a
朱老庄	0 ~ 5 cm	61.92 ± 1.75 a	46.06 ± 3.54 ab	15.86 ± 2.31 a
	5 ~ 10 cm	59.14 ± 3.22 ab	47.12 ± 1.68 a	12.02 ± 3.16 ab
	10 ~ 15 cm	54.52 ± 4.65 b	43.41 ± 0.48 bc	11.11 ± 4.49 abc
	15 ~ 20 cm	47.81 ± 2.65 c	41.52 ± 1.15 c	6.29 ± 3.44 c
	20 ~ 25 cm	48.07 ± 3.12 c	40.85 ± 1.84 c	7.22 ± 4.74 bc
北城	0 ~ 5 cm	58.84 ± 8.11 a	42.46 ± 6.31 a	16.38 ± 12.11 a
	5 ~ 10 cm	53.95 ± 5.84 ab	42.65 ± 2.23 a	11.31 ± 5.80 ab
	10 ~ 15 cm	48.48 ± 1.21 bc	41.17 ± 1.95 a	7.31 ± 1.08 ab
	15 ~ 20 cm	45.68 ± 0.72 c	39.25 ± 1.09 a	6.43 ± 0.93 b
	20 ~ 25 cm	45.05 ± 0.26 c	40.04 ± 1.24 a	5.02 ± 1.14 b

注:不同的小写字母代表同一样地不同土层间有显著差异($P<0.05$),表中数据为均值 ± 标准差($n=4$)

隙度0~25 cm土层均值以黏壤土(朱老庄)最高,依次为54.29%、43.79%、10.50%。砂质壤土(许营)分别为50.16%、42.00%、7.16%,壤土(北城)分别为50.40%、41.11%、9.29%。土壤孔隙度均表现出自上而下逐渐减少的趋势。0~5 cm与20~25 cm总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的差值,砂质壤土(许营)分别为9.50%、8.70%、0.80%,表层、底层差异主要体现在总孔隙度、毛管孔隙度($P<0.05$),非毛管孔隙度在整个剖面各层间变化不大;壤土(北城)分别为13.79%、2.42%、11.36%,表层、底层差异主要体现在总孔隙度、非毛管孔隙度($P<0.05$),毛管孔隙度在整个剖面各层间变化不大;黏壤土(朱老庄)分别为13.85%、5.21%、8.64%,三类孔隙度在表、底层均表现出明显差异($P<0.05$)。

由相关分析(表3)可知,土壤有机碳含量与容重显著负相关,与三类孔隙度均呈显著正相关关系($P<0.01$);容重与总孔隙度、非毛管孔隙度均呈显著负相关关系($P<0.01$)。前期研究发现,施加有机肥促进土壤团聚体形成[19],这可能增加土壤总孔隙度,降低土壤容重。与早期研究相比,研究区农业耕作过程中大量秸秆还田,显著增加土壤有机碳含量[20],这可能促进土壤团聚体形成,增加土壤孔隙度和非毛管孔隙度。此外,小麦根系对砂质壤土(许营)的团聚作用较差,而对壤土(北城)和黏壤土(朱老庄)、尤其是0~15 cm土层的团聚作用较强。同时,在野外剖面观察发现,在壤土(北城)和黏壤土(朱老庄)15 cm以下土层出现致密压实层,而在砂质壤土(许营)则未观察到致密压实层,从而导致砂质壤土(许营)的非毛管孔隙在各土层间无差异。

表3 相关分析结果

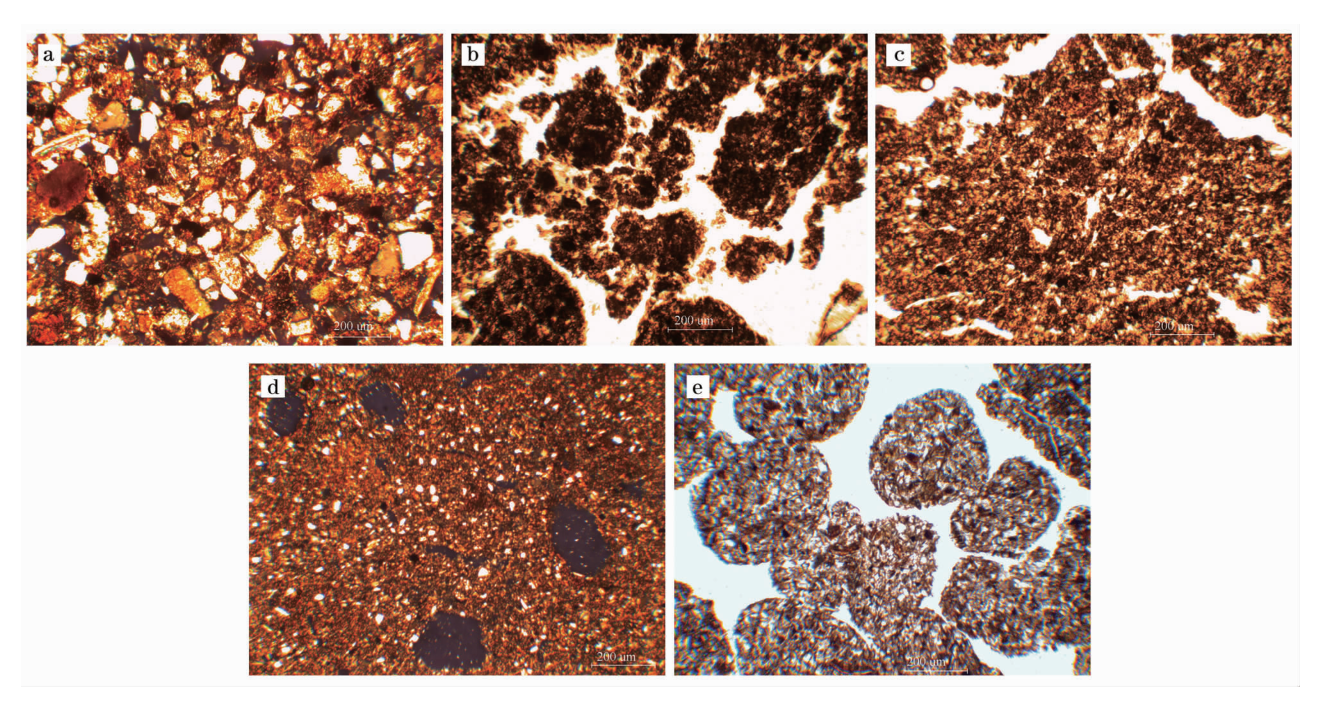
Tab.3 Results of Pearson's correlation analysis($n=60$)

指标	总孔隙度	非毛管孔隙度	容重	有机碳
毛管孔隙度	0.588**	-0.012	0.587**	0.517**
总孔隙度		0.802**	-1.000**	0.708**
非毛管孔隙度			-0.802**	0.494**
容重				-0.708**

注:**为显著性$P<0.01$

2.3 土壤薄片孔隙特征

2.3.1 孔隙形状 砂质壤土(许营)受质地影响,土壤组成物质粒径较粗,土壤孔隙以堆集孔隙(packing void)、特别是简单堆集孔隙(simple packing void)为主,少量面状孔隙(plane void),孔隙壁粗糙、吻合程度较差(图1a)。受质地影响下层压实作用不明显,各土层孔隙形状差异不大,这也是表2中砂质壤土(许营)非毛管孔隙度在各土层间差异



注:a为许营镇0~5 cm,简单堆集孔隙,xpl;b为朱老庄镇0~5 cm,复合堆集孔隙,ppl;c为朱老庄镇0~5 cm,面状孔隙、孔洞,ppl;d为北城20~25 cm,孔洞、孔道,xpl;a~d放大倍率均为10×10倍。e为北城5~10 cm,复合堆集孔隙,ppl,放大倍率5×10倍。xpl为正交偏光,ppl为单偏光

图1 土壤孔隙形态

Fig.1 Shape of soil voids

不显著的原因。

黏壤土(朱老庄)0~5 cm、壤土(北城)5~10 cm 土层团聚作用较好、土体疏松部分以复合堆积孔隙(compound packing void)为主,较大土块体内则以面状孔隙、不规则孔洞(vugh)为主。其下层由于压实作用影响,复合堆积孔隙减少、其他形状孔隙增多(图 1b、1c、1d、1e),这是表 2 中黏壤土(朱老庄)、壤土(北城)非毛管孔隙度随土壤深度增加而逐渐降低的原因。

2.3.2 孔隙数量与大小分布 土壤薄片图像测定的土壤总孔隙度介于 20.07% ~32.87%,基本呈现随土壤深度增加而降低的趋势。图像测定总孔隙度占环刀法测定孔隙度的比例变化介于 44.22% ~59.72%,即图像测定总孔隙度仅为环刀法测定土壤总孔隙度的 50% 左右,也呈现随土壤深度增加而降低的趋势。砂质壤土(许营)、黏壤土(朱老庄)、壤土(北城)剖面的全土层比例均值依次为 54.37%、49.03%、49.71%,砂质壤土薄片图像测定的孔隙对常规测定孔隙度的反映程度相对较高(表 4)。

对于孔径较大的非毛管孔隙度,土壤薄片图像测定的非毛管孔隙度介于 0.97% ~10.47%,基本呈现随土壤深度增加而降低的趋势。土壤薄片图像测定非毛管孔隙度为环刀法测定非毛管孔隙度的 73.50% ~95.02%,即土壤薄片图像测定非毛管孔隙度能反映环刀法测定非毛管孔隙度的 80% 左右,随土壤深度增加的变化趋势不一。砂质壤土(许营)、黏壤土(朱老庄)、壤土(北城)三个剖面的全土层比例均值依次为 84.12%、84.75%、82.22%,三个样地土壤薄片图像测定的非毛管孔隙对常规测定非毛管孔隙度的反映程度相差不大(表 4)。与总孔隙度相比,土壤薄片图像测定的非毛管孔隙与常规定测结果的吻合度更高,即土壤薄片图像更适合于测定研究区土壤的非毛管孔隙度。

表 4 土壤薄片孔隙图像数量与大小分布 / %

Tab. 4 Porosity and size distribution measured from thin sections / %

孔隙类型	土壤深度	砂质壤土(许营)			黏壤土(朱老庄)			壤土(北城)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
总孔隙	0~5 cm	55.04	32.87	59.72	63.66	30.66	48.15	51.01	28.49	55.84
	5~10 cm	53.45	29.61	55.39	54.7	28.02	51.23	47.15	24.93	52.88
	10~15 cm	45.08	26.05	57.79	51.06	24.66	48.30	47.69	22.12	46.39
	15~20 cm	45.88	23.25	50.68	45.46	23.05	50.71	45.89	22.58	49.21
	20~25 cm	45.31	21.87	48.28	44.61	20.87	46.78	45.39	20.07	44.22
非毛管孔隙	0~5 cm	7.32	6.62	90.50	12.47	10.47	83.94	11.35	8.34	73.50
	5~10 cm	7.65	6.86	89.66	7.71	6.53	84.67	6.87	6.53	95.02
	10~15 cm	8.64	6.94	80.33	7.97	6.94	87.05	8.64	6.57	76.00
	15~20 cm	6.35	5.20	81.87	3.18	2.44	76.68	7.76	6.52	83.99
	20~25 cm	4.49	3.51	78.23	1.06	0.97	91.41	5.12	4.23	82.57

注:A 为环刀法测定孔隙度(v/v, %);B 为薄片测定孔隙度(v/v, %);C 为 B/A(%)

3 结 论

(1) 3 种质地土壤(壤土、黏壤土、砂质壤土)容重随深度增加而增加,土壤有机碳含量随深度增加而降低。常规土壤孔隙度分析结果均表现为由表层向下逐渐减少的趋势。表层与底层孔隙度差异,砂质壤土主要表现为总孔隙度与毛管孔隙度的差异,而黏壤土与壤土则主要表现为总孔隙度与非毛管孔隙度的差异。

(2) 土壤薄片观察砂质壤土各土层孔隙形状均以简单堆集孔隙为主,而黏壤土、壤土 0~10 cm 则以复合堆积孔隙为主,其下为复合堆积孔隙减少、其他形状孔隙增多。

(3) 土壤薄片图像测定孔隙度与常规分析相比,可反映总孔隙度的 50% 左右,其中砂质壤土反映比例相对较高。对于非毛管孔隙度则可反映 80% 左右,且三类样地的反映程度相差不大。因此,土壤薄片图像测定更适合于测量非毛管孔隙。

参考文献(References)

[1] 孙梅,黄运湘,孙楠,等.农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J].土壤通报,2015,46(1):233 - 238.[SUN Mei, HUANG Yunxiang, SUN Nan, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1):233 -

238.]

[2] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:66-97. [HUANG Changyong. Pedology[M]. Beijing: China Agriculture Press,2000:66-97.]

[3] 姚贤良,程云生. 土壤物理学[M]. 北京:农业出版社. 1986:84-89. [YAO Xianliang,CHENG Yunsheng. Soil physics[M]. Beijing:China Agriculture Press,1986:84-89.]

[4] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 二版. 北京:科学出版社,1987:164-338. [XIONG Yi,LI Qingkui. Chinese soil[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,1987:164-338.]

[5] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1994:173-333. [Shandong Workstation of Soil and Fertilizer. Shandong soils[M]. Beijing:China Agriculture Press,1994:173-333.]

[6] LARS J M,RICHARD J,BILL D,et al. Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management[J]. Geoderma, 2016,268:52-59.

[7] CHIARA P,NICOLA D F,GIANLUCA S,et al. Nano to macro pore structure changes induced by long-term residue management in three different soils[J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2016,217:49-58.

[8] 周虎,李保国,吕贻忠,等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报,2010,47(6):1094-1100. [ZHOU Hu, LI Baoguo, LV Yizhong, et al. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica,2010,47(6):1094-1100.]

[9] 郭海斌,冀保毅,王巧锋,等. 深耕与秸秆还田对不同质地土壤物理性状和作物产量的影响[J]. 河南农业大学学报,2014,48(4):505-510. [GUO Haibin,JI Baoyi,WANG Qianfeng,et al. Effects of deep tillage and straw returing on soil physical properties and grain yield of different soil texture[J]. Journal of Henan Agricultural University,2014,48(4):505-510.]

[10] TOMASZ G,KATARZYNA P,STANISLAW P,et al. Effect of organic farming on a Stagnic Luvisol soil physical quality[J]. Geoderma,2016,282:16-25.

[11] 赵世伟,赵勇钢,吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(2):223-231. [ZHAO Shiwei,ZHAO Yonggang,WU Jinshui. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. Scientia Sinica (Terrae),2010,40(2): 223-231.]

[12] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报,2015,35(15):5183-5190. [LIU Yanli, LI Chengliang, GAO Xiuming, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5183-5190.]

[13] 张卫青,庞奖励,张彩云. 陕西渭北旱塬典型苹果园土壤基本性质与微形态特征研究[J]. 干旱区地理,2010,33(4):564-571. [ZHANG Weiqing,PANG Jiangli,ZHANG Caiyun. Soil properties and soil micromorphological characteristics of the apple orchard in the Weibei Dry High land, Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography,2010,33(4):564-571.]

[14] 张金萍,张保华,刘子亭. 山东省聊城市耕层土壤有机碳储量动态研究[J]. 河南农业科学,2007,36(11):67-69. [ZHANG Jinping, ZHANG Baohua,LIU Ziting. Dynamic change of organic carbon storage in top soils in Liaocheng City of Shandong Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2007,36(11):67-69.]

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:12-288. [LU Rukun. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,2000:12-288.]

[16] STOOPS G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections[M]. Soil Science Society of America, Madison, 2003.

[17] 中科院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978:66-76. [Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Methods of soil physics[M]. Beijing:Science Press,1978:66-76.]

[18] 张保华,苑学亮,刘子亭,等. 聊城市耕地地力监测点土壤有机碳含量变化研究[J]. 山东农业科学,2015,47(5):78-80. [ZHANG Baohua,YUAN Xueliang,LIU Ziting,et al. Study on soil organic matter content change of farmland productivity monitoring sites in Liaocheng City[J]. Shandong Agricultural Sciences,2015,47(5):78-80.]

[19] TISDALL J M,OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. Journal of Soil Science,1982,33:141-163.

Micromorphological characteristics of soil voids of fluvo-aquic soil in the alluvial plain of the lower Yellow River

ZHANG Bao-hua, TAO Bao-xian, CAO Jian-rong, LIU Zi-ting

(*College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng* 252000, *Shandong, China*)

Abstract: The arrangement of soil particles is a basic factor affecting soil pores. The characteristics of soil voids can be directly observed and quantitatively analyzed through the method of soil micromorphology. Liaocheng City is in the west part of Shandong Province, China and is located at the Yellow River alluvial plain. The fluvo-aquic soil accounts for 94% of the total soil area in Liaocheng City. In order to determine the effect of soil texture on soil voids of fluvo-aquic soil, the samples of loam, clay loam, and sandy loam were collected in Liaocheng City. The comparative analysis of soil voids was conducted using the method of soil micromorphology and the normal method of soil physical analysis. The results showed as follows: (1) based on the normal method of soil physical analysis, the average total soil porosity in the depth of 0 – 25 cm was 54.29% in clay loam, 50.16% in sandy loam and 50.40% in loam, and the average soil non-capillary porosity in the depth of 0 – 25 cm was 43.79% in clay loam, 42.00% in sandy loam and 41.11% in loam. (2) the total soil porosity of three types of soil decreased from surface to subsurface soil layer. With respect to sandy loam, the difference of soil porosity between surface and subsurface soil layer is attributed to the soil capillary pores, which decreases from 55.89% to 6.40%. As with loam and clay loam, the difference of soil porosity between surface and subsurface soil layer was ascribed to soil noncapillary porosity. The soil noncapillary porosity decreased from 15.86% in the surface soil layer to 7.22% in the subsurface layer in clay loam and decreased from 16.38% in the surface soil layer to 5.02% in the subsurface layer in loam. (3) according to the thin sections of soil, the main shape of soil void in the depth of 0 – 25 cm is simple packing voids in the sandy loam. With respect to clay loam and loam, the main shape of soil void is compound packing voids in the depth of 0 – 10 cm, and the number of compound packing voids decreased in the depth of 10 – 25 cm, and (4) the total soil porosity analyzed by the thin sections of soil only account for 44.22% to 59.72% of those analyzed by normal method, whereas the soil non-capillary porosity measured by the thin sections of soil account for 73.50% to 95.02% of those measured by normal method. Thus, the thin section of soil is suitable for analyzing the characteristics of non-capillary porosities.

Key words: Soil texture; soil micromorphology; soil porosity; soil void shape